

Estimativa do rendimento de grãos da soja no Rio Grande do Sul usando um modelo agrometeorológico-espectral regionalizado

Regionalized agrometeorological-spectral model for soybean yield estimation in Rio Grande do Sul, Brazil

Cleusa Adriane Menegassi Bianchi Krüger¹, Denise Cybis Fontana², Ricardo Wanke de Melo³

Resumo: A estimativa do rendimento de culturas agrícolas no período que antecede a colheita é de grande importância para o planejamento de atividades de órgãos governamentais, cooperativas e outras entidades ligadas à atividade agrícola. No Estado do Rio Grande do Sul, os rendimentos da cultura de soja apresentam grande variabilidade interanual devido, principalmente, à variabilidade da disponibilidade hídrica. Neste trabalho é apresentado um modelo que estima o rendimento de soja, baseado em dados meteorológicos (evapotranspiração relativa) e imagens de satélite (índice de vegetação), na região de produção de soja no Rio Grande do Sul. A aplicação deste modelo fornece expectativas de rendimento de soja ao final de janeiro e fevereiro e disponibiliza a estimativa do rendimento da soja no final de março. As concordâncias obtidas entre os rendimentos oficiais e os estimados foram entre boas e muito boas.

Palavras-chave: produtividade, modelagem, *Glycine max*.

Abstract: The early assessment of crop yield in periods preceding the harvest is an important issue for planning activities of the governmental institutions, cooperatives and other entities linked to the agricultural activity. In Rio Grande do Sul State, the soybean yields show a great interannual variability mainly due the variability on soil water availability during the crop growing. In this paper, it is presented a model to soybean yield assessment based on meteorological data - relative evapotranspiration -, and satellite images - vegetation index -, parametrized for soybean production region in Rio Grande do Sul State. The application of this model supplies the soybean yields expectations at the end of January and February and make available the estimative of the soybean yield at the end of March. The agreements obtained between the official and estimated yields were about good and very good.

Keywords: productivity, modeling, *Glycine max*.

Introdução

Em função da extensão territorial brasileira, metodologias objetivas de estimativa do rendimento das culturas são importantes para referenciar as estimativas subjetivas, feitas a partir de levantamentos censitários e/ou entrevistas com atores envolvidos no setor produtivo.

As instituições públicas, empresas, cooperativas e outras entidades ligadas ao setor agrícola buscam obter informações sobre o rendimento das culturas com a maior antecedência possível à colheita. Esse dado é útil para o planejamento das atividades agrícolas,

especialmente para a preparação do maquinário necessário, da mão-de-obra disponível, a armazenagem, o transporte e a comercialização de grãos, incluindo planejamento de importações e exportações.

Em nível mundial, o Brasil é o segundo maior produtor de soja, tendo produzido, na safra 2004/2005, 51 milhões toneladas, ficando atrás somente dos EUA (CONAB, 2005). No Estado do Rio Grande do Sul é um dos maiores produtores e exportadores de grãos do Brasil, sendo o terceiro maior produtor nacional de soja e onde a cultura ocupa papel estratégico sob o ponto de vista econômico e social.

¹ Engenheira Agrônoma, MSc., Fac. de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, RS. cleusa_bianchi@yahoo.com.br

² Engenheira Agrônoma, Profª. Drª., Fac. de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, RS. dfontana@ufrgs.br

³ Engenheiro Agrônomo, Dr., Fac. de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, RS. melo_rw@yahoo.com.br

No Rio Grande do Sul, contudo, verifica-se alta variabilidade na produtividade entre as safras, principalmente em razão da ocorrência de estiagens (IBGE, 2005). A frequência e os volumes acumulados das precipitações pluviais normais no Estado são insuficientes para atender as necessidades hídricas da cultura, restringindo a expressão do seu potencial produtivo (MATZENAUER et al., 2002). Sabe-se, também, que durante o florescimento e enchimento de grãos ocorrem as maiores perdas de rendimento (MATZENAUER et al., 2002). Conforme as características das variedades cultivadas de soja indicadas para o Estado do Rio Grande do Sul, e principalmente da época de semeadura, o período crítico ocorre entre os meses de janeiro e fevereiro (CUNHA & HASS, 1996).

A modelagem agrometeorológica é uma ferramenta que tem sido utilizada para a estimativa do rendimento de grãos mostrando bons resultados (BERLATO, 1987; CAMARGO et al., 1986; MATZENAUER, 1994; FONTANA et al., 2001, RIZZI, 2004). Nos trabalhos citados, foi demonstrado que o modelo agrometeorológico proposto por JENSEN (1968), que neste trabalho é aplicado para a determinação do termo agrometeorológico, é uma ferramenta muito útil em programas de monitoramento e previsão de safras. Porém, com o avanço tecnológico, modelos mais robustos têm sido sugeridos.

Bons exemplos deste avanço são os chamados modelos agrometeorológicos-espectrais, que agregam às informações meteorológicas, dados de biomassa obtidos através de sensores remotos. Conforme RUDORFF & BATISTA (1990), o termo agrometeorológico expressa as condições climáticas - radiação solar, temperatura e umidade do ar e disponibilidade hídrica, enquanto que o componente espectral expressa as diferenças de práticas de manejo, cultivares e estresses não contabilizados pelo modelo agrometeorológico.

Para a cultura da soja no Rio Grande do Sul, os trabalhos realizados por FONTANA & BERLATO (1998), MELO et al. (2003) e RIZZI (2004) mostram o avanço na precisão das estimativas de rendimento quando da incorporação dos dados espectrais. Conforme MELO et al. (2003) e RIZZI (2004), a utilização

do termo espectral introduz vantagens especialmente em termos de resolução espacial. Entretanto, ainda são convenientes alguns aprimoramentos, especialmente aqueles relativos a um maior detalhamento espacial e temporal das estimativas.

O presente trabalho foi realizado no âmbito do projeto GeoSafras, coordenado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), o qual busca o aperfeiçoamento metodológico com a incorporação de técnicas objetivas ao atual sistema de previsão e acompanhamento de safras. O objetivo foi, portanto, atender a demanda pela geração de informações sobre o rendimento da soja com adequado detalhamento espacial e com a possibilidade de obtenção de expectativas de rendimento nos meses que antecedem a colheita.

Material e Métodos

A área de estudo compreendeu a região norte-noroeste do Estado (MELO et al., 2004) (Figura 1) que responde por, aproximadamente, 75% do total de soja produzido no Estado. O relevo da região é suave ondulado, com altitude média próxima a 465m. O solo predominante é o Latossolo Vermelho, sendo encontradas também outras cinco subordens de solo em menor proporção nesta área (EMBRAPA, 1999). O clima da região é do tipo Cfa, segundo classificação de KÖPPEN (1948), que corresponde a um clima subtropical, com precipitação pluvial bem distribuída ao longo do ano e temperatura média de 22°C.

O modelo agrometeorológico-espectral utilizado neste estudo tem como base o modelo ajustado por MELO (2003), introduzindo melhorias na resolução espacial e temporal do mesmo. Para a melhoria espacial, a região produtora de soja foi dividida em três sub-regiões, classificadas conforme os diferentes níveis de rendimento de soja (Figura 1) (MELO et al., 2004). Em termos de melhoria temporal, o modelo foi ajustado para três períodos, quais sejam: expectativas de rendimento ao final de janeiro e fevereiro e estimativa de rendimento ao final de março. As expectativas são consideradas como sendo os valores esperados de rendimento antes do final do ciclo da cultura, sendo que estes valores podem apresentar ainda grande variação em função de alguns fatores que interferem nos rendimentos finais, principalmente a disponibilidade hídrica durante os períodos de florescimento e enchimento de grãos.

A estimativa é considerada como sendo o valor final dos rendimentos, obtido ao final do ciclo da cultura. O modelo é dado por:

$$Y = Ym \times [(a \times TA) + (b \times TE)] \quad (1)$$

em que: Y é o rendimento estimado ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), Ym rendimento máximo ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), TA o termo agrometeorológico, TE o termo espectral e a , b são os coeficientes de ajuste da equação. O rendimento máximo foi determinado como sendo o maior rendimento da série estudada (1981 a 2005) (IBGE, 2005), sendo para as regiões 1, 2 e 3, respectivamente de 2.929, 2.578 e $2.261 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

O termo TA foi obtido pela equação de JENSEN (1968), modificada por BERLATO (1987):

$$TA = \left[\prod_{i=1}^n \left(\frac{ETr}{ETo} \right)_i^{\lambda_i} \right] \quad (2)$$

em que ETr/ETo é a evapotranspiração relativa do período i (meses) e λ é o expoente que expressa a sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico em cada período i . Os meses utilizados no modelo variam conforme o detalhamento temporal estabelecido, ou seja: para a geração das expectativas de rendimento em janeiro é utilizada a evapotranspiração relativa de dezembro e janeiro; para a expectativa em fevereiro é utilizada a evapotranspiração relativa de dezembro, janeiro e fevereiro e, finalmente, para a estimativa em março é utilizada a evapotranspiração relativa de dezembro, janeiro, fevereiro e março.

Os expoentes λ foram obtidos através de regressão linear múltipla estabelecida entre as transformadas logarítmicas do rendimento relativo (Y/Ym) da soja e da evapotranspiração relativa (ETr/ETo), na equação 2, passando pela origem. Os dados meteorológicos necessários ao ajuste de TA , em nível decenal, foram obtidos das estações meteorológicas pertencentes ao 8º Distrito do Instituto Nacional de Meteorologia (8º DISME/INMET) e a Fundação de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Sul (FEPAGRO), localizadas nos municípios de Erechim, Cruz Alta, Santa Rosa, São Luiz Gonzaga, Iraí, Júlio de Castilhos e Passo Fundo (Figura 1).

A evapotranspiração de referência (ETo) foi calculada pelo método de PENMAN (1956). A evapotranspiração real (ETr) foi obtida a partir do balanço hídrico meteorológico, pelo método de THORNTHWAITE & MATHER (1955), utilizando uma capacidade de água disponível, média para a região, de 75mm, que corresponde a um valor médio para os valores de CAD dos solos do Rio Grande do Sul.

O termo TE é representado pelas imagens de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*), provenientes do sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) que está a bordo dos satélites da série NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). A série de imagens de 1980 a 2000 foi adquirida do Clark Labs da Clark University (USA). A partir de 2000, as imagens foram fornecidas pelo Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

No caso da expectativa de rendimento gerada ao final do mês de janeiro, TE foi dado pela composição de máximo valor referente somente ao mês de janeiro. Nos demais casos, foram utilizados os dados de NDVI médio dos meses de janeiro e fevereiro, em razão destes meses terem apresentado as maiores correlações com os dados de rendimento na série avaliada (MELO, 2003).

A análise dos dados foi desenvolvida pela comparação entre os rendimentos oficiais em cada ano agrícola e os respectivos rendimentos estimados pelos modelos, utilizando o coeficiente de correlação da análise de regressão linear para estabelecer o nível de significância pelo teste “t”, traçando-se uma reta teórica que representa a correlação perfeita entre os valores, conhecida como linha 1:1 (um para um). Quanto menor a dispersão dos pontos em torno da linha 1:1, melhor é a previsibilidade do modelo. Entretanto, o r (coeficiente de correlação) não deve ser utilizado individualmente em uma análise de desempenho, pois muitas vezes não está relacionado com o tamanho da diferença entre um valor padrão e um valor previsto por modelos de estimativa ou outros mecanismos de medida diferentes do padrão (WILLMOTT & WICKS 1980).

Para se quantificar a homogeneidade da dispersão em relação à linha 1:1 empregou-se o teste de concordância de WILLMOTT (1981) :

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - O_m| + |O_i - O_m|)^2} \right] \quad (3)$$

em que, E_i é o valor estimado, O_i o valor oficial e O_m a média dos valores oficiais. A faixa de valores do índice de concordância (d) varia entre 0 (zero) para nenhuma concordância a 1 (um) para uma concordância perfeita.

Para o ajuste dos parâmetros do modelo utilizou-se uma série de dados de produtividade de soja das safras de 1981 a 2005, sendo que para o teste do mesmo foram selecionadas aleatoriamente as safras de 1985, 1992, 1994, 1999, 2000, 2004 e 2005, que não entraram nos cálculos realizados para o ajuste. As análises foram realizadas para as três regiões de produção, considerando os três diferentes meses para a divulgação dos dados de rendimento: janeiro, fevereiro e março.

Resultados e Discussão

Os expoentes do termo agrometeorológico (TA) do modelo ajustado para cada região e mês de estimativa são mostrados na Tabela 1, sendo todos significativos a 5% de probabilidade, o que demonstra a robustez do modelo proposto. Os expoentes apresentaram valores crescentes ao longo dos meses, ou seja, a sensibilidade da cultura à ocorrência de deficiência hídrica cresce de dezembro para fevereiro. Segundo o calendário agrícola médio para esta região (CUNHA & HASS, 1996), no mês de fevereiro a soja encontra-se em pleno florescimento e início de enchimento de grãos.

Os valores dos expoentes (Tabela 1) indicam a sensibilidade de cada período (mês) à ocorrência de deficiência hídrica para a definição dos rendimentos. Observa-se que, à medida que são introduzidos novos meses para a produção dos valores de expectativa e estimativa dos rendimentos, os valores dos expoentes são modificados. E quanto mais próximo do período de florescimento e enchimento de grãos, maior o valor do expoente. No modelo de estimativa (março) os

expoentes de dezembro apresentam valores superiores aos expoentes de janeiro, indicando que a ocorrência de deficiência hídrica no período vegetativo tem alguma importância, que decresce com o tempo, mas que não se aproxima da importância desta do período de florescimento e enchimento de grãos, que apresenta valores de expoentes maiores.

O modelo de estimativa do rendimento da soja, feita ao final do mês de março, apresentou coeficientes menores em janeiro, atingindo os máximos valores em fevereiro e um pequeno decréscimo em março. Somente na região 2, o expoente do mês de março foi ligeiramente maior do que o expoente do mês de fevereiro (Tabela 1).

Os expoentes do termo agrometeorológico encontrados neste trabalho mostraram coerência com as fases fenológicas da cultura da soja no Rio Grande do Sul e, também, apresentaram magnitudes semelhantes àquelas observadas em trabalhos anteriores (BERLATO, 1987; FONTANA et al., 2001).

As estatísticas do ajuste das regressões lineares usando os termos agrometeorológico e espectral são apresentadas na Tabela 2. Todas as equações propostas apresentaram coeficientes de determinação significativos, maiores na medida em que um maior volume de informações foi utilizado (final de março). Observa-se que os coeficientes ajustados para o termo agrometeorológico foram sempre superiores aos coeficientes ajustados para o termo espectral. Isto demonstra a maior influência da disponibilidade hídrica para a definição dos rendimentos, quando comparada à influência de outros fatores, avaliados através da análise da quantidade de biomassa produzida. Os coeficientes para TA apresentaram os maiores valores para as estimativas geradas ao final do mês de março na região 1. Isto indica que quanto mais se avança no calendário agrícola, maior a importância da disponibilidade hídrica para a produção da estimativa do rendimento de grãos, devido à aproximação do período crítico.

Já para o termo espectral a resposta foi oposta, ou seja, foram observados os menores coeficientes para a estimativa ao final de março na região 1. A explicação está no fato de que a estimativa em janeiro é realizada antes da fase de florescimento e enchimento de grãos, ou seja, a soja encontra-se em pleno desenvolvimento vegetativo.

Neste período, uma maior densidade de massa verde, expressa por maiores valores de NDVI, tem grande importância na definição do rendimento final de grãos. Esta importância é, entretanto, diminuída quando se passa a considerar as fases de florescimento e enchimento de grãos, nas quais a ocorrência de deficiência hídrica tem muito mais importância em termos de definição dos rendimentos e não mais de densidade de biomassa.

Ao serem comparados os rendimentos apresentados pelo IBGE e as expectativas de rendimento estimadas pelo modelo de janeiro (Figura 2), nota-se que a região 3 apresentou uma menor dispersão, enquanto que a região 1 foi a que apresentou maior dispersão, informação também confirmada pelo valor assumido pela soma do quadrado dos erros (Tabela 2). Neste mês, o modelo agrometeorológico-espectral apresentou valores acima e abaixo aos apresentados pelo do IBGE nas três regiões. Nas expectativas geradas em fevereiro observou-se uma diminuição na dispersão dos dados para as três regiões, o que é expresso pelo aumento dos coeficientes de determinação (Tabela 2). Entretanto, foi observada uma tendência de subestimativa dos rendimentos pelo modelo. O melhor ajuste foi observado para as estimativas obtidas ao final do mês de março. Neste caso, verificou-se uma menor dispersão dos dados em relação à linha 1:1. Este modelo é recomendado, portanto, para o fornecimento de dados de rendimento, com grau de confiabilidade satisfatório para os objetivos pretendidos. Também, confirmando outros autores (BERLATO, 1987; FONTANA et al., 2001), o modelo apresenta ainda uma grande vantagem, a de ser possível estimar o rendimento de grãos com cerca de um mês de antecedência da colheita. Sendo então um modelo regionalizado se tem uma melhor definição dos rendimentos máximos, ou seja, na medida em que se utilizam sub-regiões dentro da região de produção, é possível representar de forma mais adequada às diferenças de solo, clima e manejo da cultura dentro da grande região de produção de soja.

Os valores de rendimento gerados ao final dos meses de janeiro e de fevereiro, apesar de apresentarem resultados inferiores aos obtidos em março, são muito úteis no fornecimento de expectativas de rendimento enquanto a cultura ainda está em desenvolvimento. Enfatiza-se,

entretanto, que os mesmos devem ser considerados somente como expectativas, uma vez que é no período crítico (florescimento e enchimento de grãos) que se tem a definição dos valores finais de rendimento de grãos.

A qualidade do detalhamento espacial das estimativas de rendimento em cada região pode ser analisada na Figura 3, onde são mostrados os desvios médios, máximo e mínimo entre os valores de rendimento de grãos da soja apresentados pelo IBGE e os estimados pelos modelos para todos os *pixels* das imagens. Pode-se observar que são grandes os desvios entre os valores de rendimento estimados pelos modelos e aqueles obtidos pelo IBGE. Estes valores são muito superiores aos desvios verificados para a média de rendimento de cada região, o que era esperado, visto que à medida que se aumenta o grau de detalhamento da análise, outros fatores decorrentes do manejo empregado pelos produtores passam a crescer de importância na definição dos rendimentos. Parte destes fatores é possível de ser detectada via introdução do termo espectral ao modelo. Entretanto, é importante considerar a característica regional das análises realizadas com imagens NOAA, visto que cada *pixel* da imagem representa uma área, em geral, muito superior a de uma lavoura individual, ou seja, integrando diversas lavouras de soja (ou mesmo outras culturas) e outros tipos de cobertura do solo. Na Região 3 ocorreu uma menor amplitude dos desvios, sendo, somente em poucos anos, superiores a 1.000 kg.ha^{-1} (positivos ou negativos). Nas demais regiões verificaram-se desvios maiores. A magnitude dos desvios das estimativas aponta para a necessidade de continuidade dos estudos, com a confrontação dos dados estimados pelos modelos com dados obtidos diretamente em lavouras situadas na região de estudo. Isto é muito importante na medida em que todas as comparações realizadas neste trabalho confrontam dados de estimativas obtidas através da modelagem com dados de estimativas obtidas através de métodos subjetivos.

Os índices de concordância (*d*), entre os rendimentos estimados pelo modelo e os rendimentos oficiais, indicaram que as concordâncias obtidas foram boas para os modelos de janeiro e fevereiro, e muito boa para o modelo do mês de março (Tabela 3). À medida que são considerados os períodos que mais têm influência na definição dos rendimentos, no cálculo dos rendimentos estimados, o índice de concordância tem seu valor aumentado.

Agradecimentos

O projeto foi financiado pela CONAB/PNUD e os autores agradecem o fornecimento das séries de dados meteorológicos (FEPAGRO e 8º DISME/INMET) e de dados de culturas (IBGE e CONAB).

Conclusões

O modelo agrometeorológico-espectral proposto e testado neste trabalho atende à demanda dos órgãos nacionais responsáveis pelo acompanhamento de safras que necessitam de instrumentos objetivos de estimativa de rendimentos, com adequado grau de detalhamento temporal e espacial.

Em termos temporais, é possível a obtenção de expectativas de rendimento ao final dos meses de janeiro e fevereiro. É, entretanto, ao final do mês de março que as estimativas são mais precisas e acuradas. Em termos espaciais, há a necessidade de confrontar os dados estimados pelos modelos com dados obtidos diretamente em lavouras situadas na região de estudo.

Referências Bibliográficas

BERLATO, M. A **Modelo de relação entre o rendimento de grãos e soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. 1987. 103f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Curso de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

CAMARGO, M. B. P.; BRUNINI, O. & MIRANDA, M. A. C. Modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade para a cultura da soja no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, 45 (2): 279-292, 1986.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Safras**. Capturado em 30 mar. 2005. On line. Disponível em <http://www.conab.gob.br>.

CUNHA, G. R., HASS, J. C. **Zoneamento agrícola: recomendações de época de semeadura de soja para o Estado do Rio Grande do Sul-Safra 1996/97**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1996. 28 p. (EMBRAPA-CNPT. Documentos, 29).

EMBRAPA, **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1999. 412p.

FONTANA, D. C., BERLATO, M. A. Modelo agrometeorológico-espectral para a estimativa do rendimento da soja no Estado do Rio grande do Sul: um estudo preliminar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, 1998. Santos, SP. **Anais...** Santos: [s.n.], 1998. 1 CD-ROM.

FONTANA, D. C. et al. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n.3 , p. 399-403, 2001.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal**. Capturado em 30 jul. 2005. On line. Disponível em <http://www.ibge.gob.br>.

JENSEN, M. E. Water consumptions by agricultural plants. In: KOZLOWSKY, T. T.; (ed.) **Water deficits and plant growth**. New York: Academic Press, 1968. Cap.2, p.1-22.

KÖPPEN, W. **Climatología**. México, DF: Fondo de Cultura Económica, 1948. 71p.

MATZENAUER, R. **Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1994. 172p. Tese (Doutorado) - UFRGS, 1994.

MATZENAUER R. et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002, 105p. (Boletim FEPAGRO, 10).

MELO, R. W. et al. Indicadores de produção de soja no Rio Grande do Sul comparados ao zoneamento agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n.12, p. 1167-1175,

2004.

MELO, R. W.; FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Modelo agrometeorológico - espectral de estimativa de rendimento da soja para o Estado do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003. Belo Horizonte, MG. **Anais...** São José dos Campos: [s.n.], 2003. 1 CD-ROM.

MELO, R. W. **Modelo agrometeorológico espectral de estimativa do rendimento da soja para o Estado do Rio Grande do Sul.** 2003. 88f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia, Agrometeorologia) – Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PENMAN, H. L. Evaporation: an introductory survey. **Netherland Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v.4, p.9-29, 1956.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja:** estudo de caso no Rio Grande do Sul. São José dos Campos: INPE, 2004. 212p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.31, p.53-63, 1990.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water budget and its use in irrigation. In: THE YEARBOOK OF AGRICULTURE: **Water**. Washington, D.C.: Department of Agriculture, 1955. p.346-358.

WILLMOTT, C.J., WICKS, D.E. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. **Physical Geography**, Los Angeles, v. 1, p. 59-73, 1980.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, Los Angeles, v. 2. p. 184-194, 1981.

Tabela 1. Expoentes para cálculo do termo agrometeorológico do modelo de estimativa do rendimento da cultura da soja.

Mês de estimativa	Região	Expoentes			
		Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março
Janeiro	1	0,498	0,983		
	2	0,535	0,948		
	3	0,607	0,882		
Fevereiro	1	0,359	0,516	0,839	
	2	0,355	0,542	1,142	
	3	0,477	0,444	0,785	
Março	1	0,299	0,261	0,652	0,586
	2	0,361	0,277	0,720	0,727
	3	0,427	0,233	0,630	0,487

Tabela 2. Coeficientes para cálculo do rendimento médio da cultura da soja através do modelo agrometeorológico-espectral.

Mês de estimativa	Região	Termos		Estatísticas	
		TA	TE	R ²	SQE
Janeiro	1	0,675	0,267	0,63	0,174
	2	0,658	0,277	0,64	0,155
	3	0,605	0,358	0,52	0,245
	1	0,802	0,139	0,78	0,103

Fevereiro	2	0,790	0,170	0,75	0,106
	3	0,729	0,224	0,60	0,200
	1	0,882	0,083	0,84	0,071
Março	2	0,852	0,123	0,83	0,071
	3	0,799	0,173	0,65	0,175

TA = Termo Agrometeorológico

TE = Termo Espectral

R² = Coeficiente de Determinação

SQE = Soma dos Quadrados dos Erros

Tabela 3. Valores do índice de concordância (*d*) entre os rendimentos estimados pelo modelo agrometeorológico-espectral e os rendimentos oficiais.

Modelo	Região 1	Região 2	Região 3
Janeiro	0,85	0,85	0,85
Fevereiro	0,88	0,85	0,83
Março	0,95	0,92	0,90

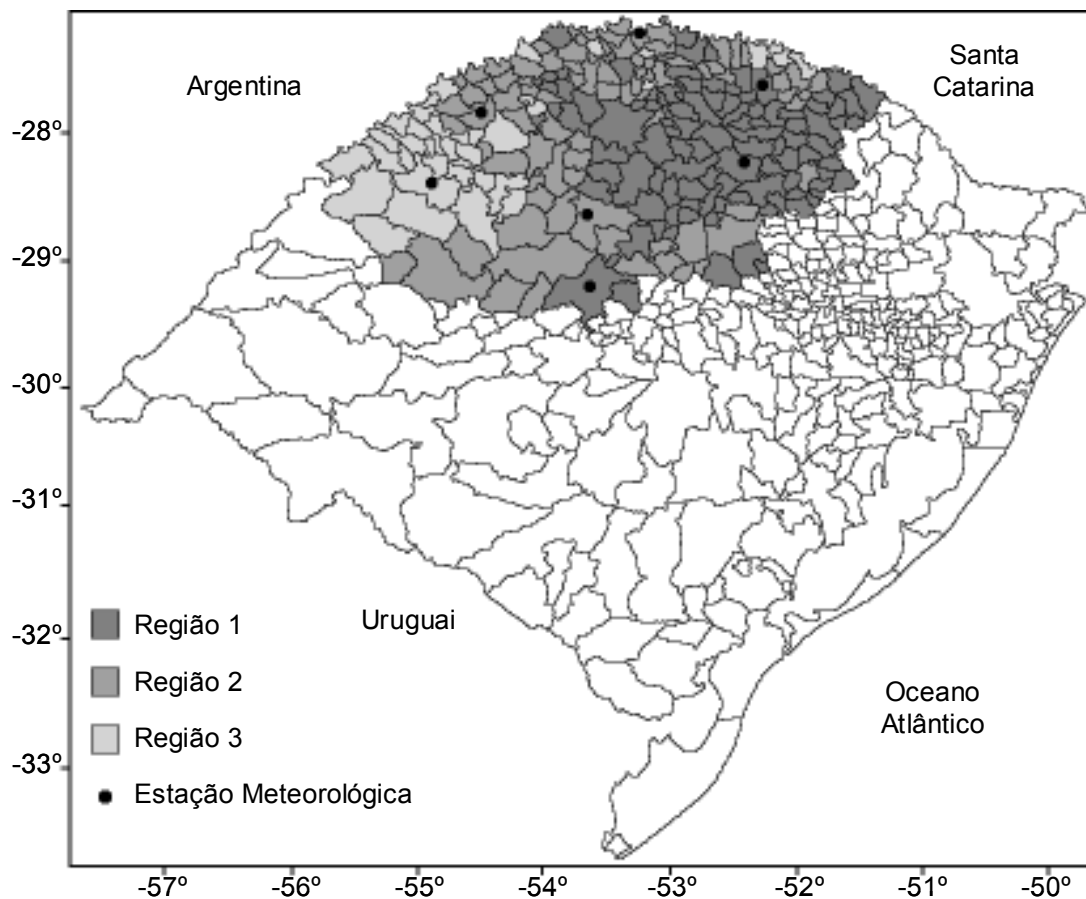


Figura 1. Regiões 1, 2 e 3 agrupadas conforme o rendimento médio da soja no Estado Rio Grande do Sul (Fonte: Melo et al., 2004). Os pontos pretos situam as estações meteorológicas utilizadas.

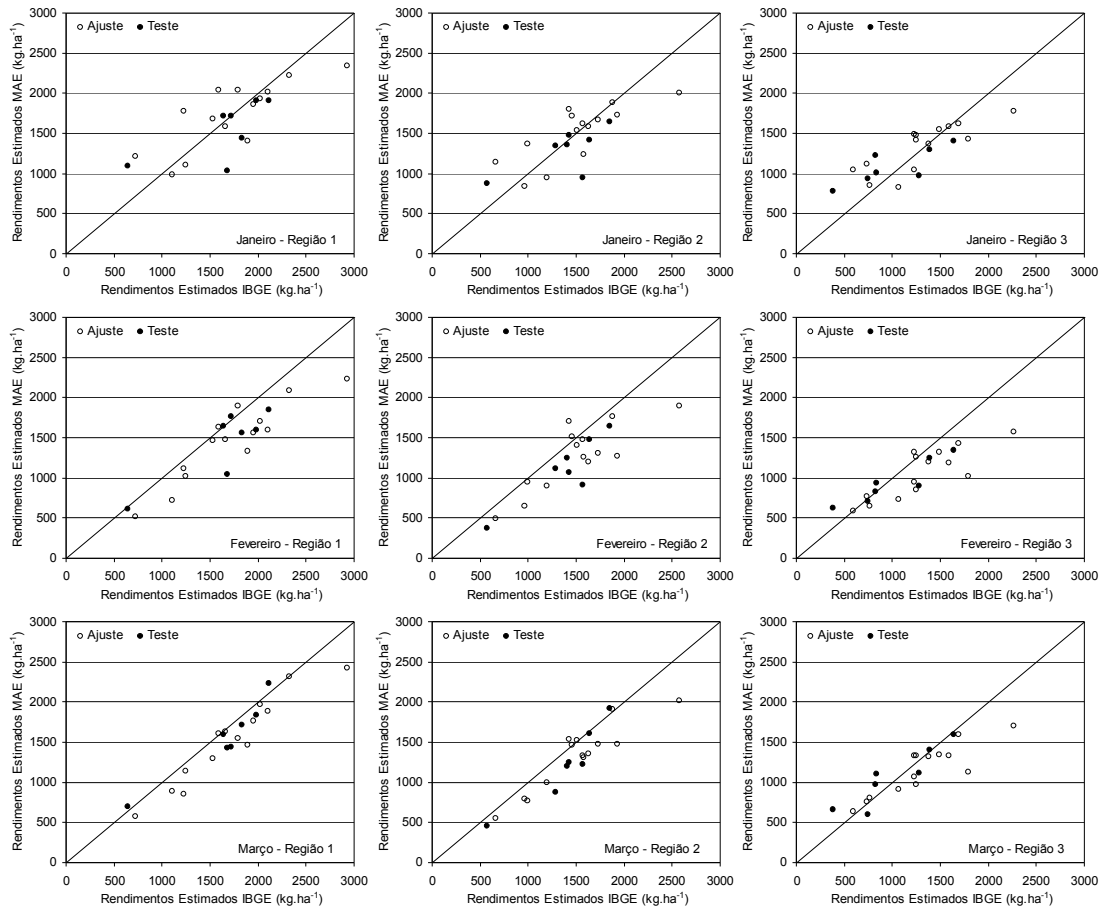


Figura 2: Diagrama de dispersão do rendimento de soja estimado pelo modelo de janeiro, fevereiro e março para as três regiões, e os rendimentos oficiais considerando os anos de ajuste e teste do modelo.

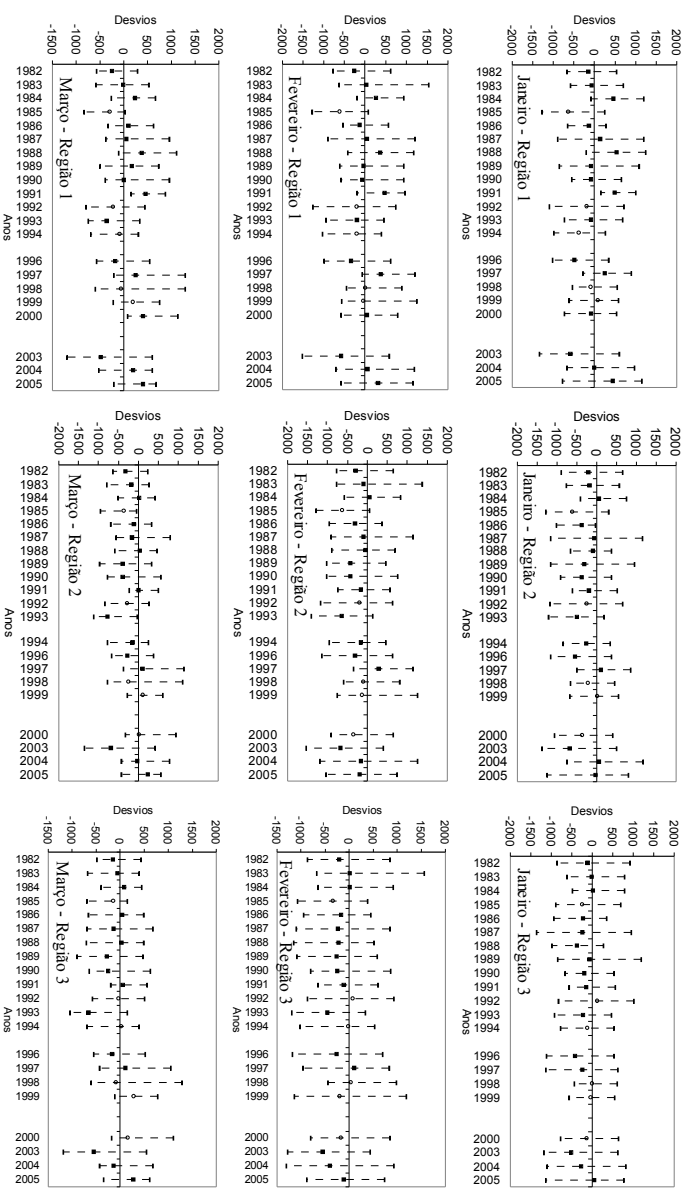


Figura 3. Desvios entre o rendimento da soja obtido pelo modelo agrometeorológico-espectral e pelo IBGE nos *pixels* que compõem as três regiões nos meses de janeiro, fevereiro e março.